

파라미터 불확실성을 갖는 시간지연 비선형시스템의 지연종속 퍼지 H_∞ 제어

Delay dependent fuzzy H_∞ control of delayed nonlinear systems with parameter uncertainty

이 갑 래¹⁾, 김 태 식²⁾, 이 해 창²⁾
(Kap Rai Lee, Tae Sik Kim, Hae Chang Lee)

Abstract - A delay dependent fuzzy H_∞ controller design method for delayed nonlinear systems with parameter uncertainty is considered. Using delay-dependent Lyapunov function, the asymptotical stability and H_∞ performance problem are discussed. A sufficient condition for the existence of fuzzy controller is presented in terms of linear matrix inequalities(LMIs). A simulation example through radar gimbal system is given to illustrate the design procedures and performances of the proposed methods

Keywords: 시간지연 및 파라미터 불확실성, 퍼지 시스템, 퍼지 H_∞ 제어기, 지연종속 제어기, 선형행렬 부등식

1. 서 론

시간지연을 갖는 비선형 시스템에 대한 체계적인 퍼지 제어기 설계 연구가 최근에 많이 이루어지고 있다. 시간지연의 크기에 상관없이 시스템을 안정화 시키는 지연독립적인 방법으로서 Cao 등[1]은 안정성을 만족하는 관측기 구조의 퍼지 제어기를 설계하였으며 Lee[2] 등은 안정성과 H_∞ 성능을 만족하는 출력제한 제어기를 설계하였다.

시간 지연의 크기가 크지 않은 경우 지연 독립적 안정화 방법보다 지연 종속적인 안정화 방법이 더 적당한 방법으로 선형 시스템에서는 잘 알려져 있으며, 특히 시간지연 상한치를 고려한 지연 종속적인 방법이 효과적이다[3, 4]. 시간 종속적인 퍼지 제어기 설계방법으로서 Jeung[5]등은 안정화 제어기를 설계하였으며 Lee[6]은 지연 종속 H_∞ 필터를 설계하였다. 본 논문에서는 시간지연 뿐만 아니라 파라미터 불확실성을 갖는 퍼지 시스템에 대해서 안정성과 H_∞ 성능을 보장하는 지연 종속적인 퍼지 H_∞ 제어기를 설계한다. 지연 종속적 Lyapunov 함수를 이용하여 폐-루프 시스템의 안정성과 H_∞ 성능 조건을 동시에 만족하는 충분조건을 유도한다. 또한 이러한 충분조건식으로부터 퍼지 제어기 존재할 조건을 선형행렬부등식으로 나타내고, 퍼지 제어기는 선형행렬 부등식의 해로부터 구하며, 선형행렬 부등식에는 시간지연 크기가 포함된다.

II. 지연종속 퍼지 H_∞ 제어

불확실성 및 시간지연을 갖는 T-S 퍼지 모델

Plant Rule:

IF $z_1(t)$ is M_{i_1} and ... and $z_g(t)$ is M_{i_g}
THEN $\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i(t))x(t) + B_{wi}u(t) + B_{di}u(t-\tau) + (B_i + \Delta B_i(t))w(t)$

$$e(t) = C_i x(t) + D_i u(t), \quad i = 1, 2, \dots, r$$

$$x(t) = 0, \quad t \leq 0 \tag{1}$$

을 고려한다. 여기서 M_{ij} 는 퍼지 집합이고, $x(t) \in R^n$ 는 상태변수 $u(t) \in R^m$ 은 입력, $w(t) \in R^p \in L_2(0, T)$ 는 제한된 에너지를 갖는 외부의란, $e(t) \in R^q$ 는 제어할 변수, r 은 IF-THEN 규칙의 수, $z_1 \sim z_g$ 는 측정 가능한 시스템 변수, 즉 전건부 변수이며, $A_i, \Delta A_i, B_i, B_{wi}, C_i, D_i$ 는 공칭시스템을 나타내는 적절한 차원을 갖는 상수행렬이다. τ 는

$$0 \leq \tau \leq \bar{\tau} \tag{2}$$

을 만족하는 미지의 상수 시간지연이라고 가정한다. 시변 파라미터 불확실성

$$[\Delta A_i(t) \ \Delta B_i(t)] = HF(t)[E_{xi} \ E_{wi}] \quad i = 1, 2, \dots, r$$

와 같이 가정하면, H, E_i 는 적절한 차원을 갖는 상수 행렬이고, $F(t)$ 는

$$F(t) \in \Omega = \{F(t) | F^T(t)F(t) \leq I\}$$

로 크기가 제한된 모르는 행렬함수이다. 퍼지 시스템의 추론된 최종 출력은

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{ (A_i + HF(t)E_i)x(t) + (B_i + HF(t)E_{wi})u(t) + B_{wi}u(t) + B_{di}u(t-\tau) \}$$

$$e(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{ C_i x(t) + D_i u(t) \}$$

$$x(t) = 0, \quad t \leq 0 \tag{3}$$

이다. 여기서

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^g M_{ij}(z_j(t))$$

$$h_i(z(t)) = w_i(z(t)) / \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \tag{4}$$

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_g(t)]^T$$

이며, $M_{ij}(z_j(t))$ 는 멤버십 함수 M_{ij} 에서 $z_j(t)$ 의 멤버십 등급이다. 모든 시간 t 에 대하여

1) 평택대학교 정보과학부

2) 항공우주연구원 항공사업단 항공체계실

※ 본 논문은 산업자원부에서 시행한 민군겸용기술개발사업 지원에 의하여 연구되었음

$$\begin{aligned} w_i(z(t)) &\geq 0, \quad i=1,2,\dots,r \\ \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) &> 0 \end{aligned} \quad (5)$$

을 가정하면

$$\begin{aligned} h_i(z(t)) &\geq 0, \quad i=1,2,\dots,r \\ \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

이다. 퍼지 시스템 (1)에 대한 상태제한 퍼지 H_∞ 제어기로

Control Rule i :

$$\begin{aligned} \text{IF } z_1(t) \text{ is } M_{i_1} \text{ and } \dots \text{ and } z_r(t) \text{ is } M_{i_r} \\ \text{THEN } u(t) = K_i x(t), \quad i=1,2,\dots,r \end{aligned} \quad (7)$$

을 고려한다. 여기서 K_i 는 설계되어질 제어기의 i 번째 이득행렬이다. 이러한 퍼지 제어기의 최종 출력은

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_i x(t) \quad (8)$$

이다. 퍼지 제어기 (8) 및 퍼지 시스템 (3)으로부터 페루프 시스템

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (\bar{A}(z) + HF(t)E_x(z))x(t) + \bar{A}_d(z)x(t-\tau) \\ &\quad + (\bar{B}(z) + HF(t)E_w(z))u(t) \\ x(t) &= 0, \quad t \leq 0 \\ e(t) &= \bar{C}x(t) \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 여기서

$$\begin{aligned} \bar{A}(z) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) \bar{A}_{ij} \\ \bar{A}_d(z) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) B_{di} K_i \\ \bar{B}(z) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \bar{B}_i \\ \bar{C}(z) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(x(t)) h_j(x(t)) \bar{C}_{ij} \\ E_x(z) &= \sum_{i=1}^r h_i(x(t)) E_{xi} \\ E_w(z) &= \sum_{i=1}^r h_i(x(t)) E_{wi} \\ \bar{A}_{ij} &= A_i + B_{ui} K_j, \quad \bar{A}_{di} = B_{di} K_i \\ \bar{B}_i &= B_i, \quad \bar{C}_{ij} = C_i + D_i K_j \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 주어진 γ 에 대해서 H_∞ 제어 성능

$$J_\infty := \int_0^T \|\bar{e}(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|u(t)\|^2 dt \quad (12)$$

을 고려한다. 여기서 $T > 0$, $w \in L_2[0, T]$ 이며 $\|\cdot\|$ 는 Euclidean norm 이다.

본 논문에서는 시간지연을 갖는 퍼지 시스템 (3)에 대해서 페-루프 시스템 (9)을 안정화 할뿐만 비용함수 (12)를 만족하는 지연 종속적인 제어기 (8)의 K_i 를 설계하고자 한다.

정리 1. 시간지연을 갖는 시스템 (3)을 고려한다. 선형행렬 부등식

$$\Phi_{ii} < 0, \quad i=1,2,\dots,r, \quad (13)$$

$$\Phi_{ij} + \Phi_{ji} < 0, \quad i < j < r, \quad i=1,2,\dots,r, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ * & X^T + X - S^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (15)$$

을 만족하는 행렬 $X > 0$, $S > 0$, H , L_1 , L_2 , Y_i , $i=1,2,\dots,r$, 및 상수 $\lambda > 0$, $\gamma > 0$ 가 존재하면, 퍼지 제어기 (8)은 H_∞ 제어성능 (12)를 만족하는 제어기이다. 여기서

$$\Phi_{ij} = \begin{bmatrix} (1,1) & B_{di} Y_j - L_2 & B_i & \lambda^{-1} H & (1,5) & (1,6) & X E_i^T \\ * & -L_3 & 0 & 0 & \bar{\tau} Y B_{di}^T & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & \bar{\tau} B_i^T & 0 & E_{wi}^T \\ * & * & * & -\lambda^{-1} I & H^T & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\bar{\tau} S^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\lambda^{-1} I \end{bmatrix} \quad (16)$$

이며 (1,1), (1,5) 및 (1,6)는

$$\begin{aligned} (1,1) &= A_i X + X A_i^T + B_{ui} Y_i + Y_i^T B_{ui}^T + \bar{\tau} L_1 + 2L_2 + L_3 \\ (1,5) &= \bar{\tau} [X A_i^T + Y_i^T B_{ui}^T] \\ (1,6)^T &= [C_i X + D_i Y_i] \end{aligned} \quad (17)$$

이다. 또한 제어기 이득 값은

$$K_i = Y_i Q^{-1}, \quad i=1,2,\dots,r \quad (18)$$

로 구해진다.

(증명): $P > 0$, $S > 0$ 및 $R > 0$ 을 만족하는 Lyapunov 함수

$$V(x, t) = V_1(x, t) + V_2(x, t) + V_3(x, t) \quad (19)$$

을 고려한다. 여기서

$$V_1(x, t) = x^T(t) P x(t) \quad (20)$$

$$V_2(x, t) = \int_{-t}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) S \dot{x}(s) ds d\theta \quad (21)$$

$$V_3(x, t) = \int_{t-\tau}^t x^T(s) R x(s) ds \quad (22)$$

이다. Lyapunov 함수로부터 $u(t) = 0$ 인 시스템 (9)의 모든 궤적에 대해 $V(x, t) \leq 0$ 을 만족하면 Lyapunov-Krasovskii 정리[7]로부터 시스템 (9)은 점근적으로 안정하다. H_∞ 성능 (12)을 고려하기 위하여

$$J_a(t) := V(x, t) + e^T(t) e(t) - \gamma^2 w^T(t) w(t) \quad (23)$$

을 고려한다. 시간지연 항 및 다음 관계식

$$x(t-\tau) = x(t) - \int_{t-\tau}^t \dot{x}(s) ds \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^r h_i h_j h_k h_l X_{ij}^T S X_{kl}^T \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j X_{ij}^T S X_{ij}^T$$

을 이용하여 전개한 후, S-과정(S-procedure) 과 Schur 보수를 이용하면

$$J_a \leq \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) h_i(z(t)) \Omega_{ii} + \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) (\Omega_{ij} + \Omega_{ji}) \quad (25)$$

이다. 여기서

$$\Omega_{ij} = \begin{bmatrix} (1,1) & P \bar{A}_{di} - R' & P \bar{B}_i & P H & \bar{A}_{ij}^T & \bar{C}_i^T & E_{xi}^T \\ * & -R & 0 & 0 & \bar{A}_{di}^T & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & \bar{B}_i^T & 0 & E_{wi}^T \\ * & * & * & -\lambda I & H^T & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -(\tau S)^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & 0 & -\lambda^{-1} \end{bmatrix}$$

이며 R, R', S 는

$$\begin{bmatrix} R & R' \\ * & S \end{bmatrix} \geq 0 \quad (26)$$

을 만족해야한다. *는 대칭행렬의 주 대각 아래 성분을 나타낸다. $P^{-1} = X$ 로

$$\begin{aligned} K_i X &= Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, r \\ X R X &= L_1 \\ X R' X &= L_2 \\ X R X &= L_3 \end{aligned} \quad (27)$$

이용한 후 전개하면 (13), (14), (15)가 얻어진다. □

따름정리 1의 모든 부등식은 변수에 대해서 선형 행렬 부등식(LMI)으로 나타나 있으므로 LMI Toolbox를 이용하면 모든 변수의 해는 바로 구할 수 있다[8,9].

III. 설계 예제

항공기용 레이더 김벌 안정화 장치를 고려한다. 김벌 기구부의 토크 균형방정식을 유도하면

$$T_b = J_b \frac{dw_b}{dt} + B_b w_b + T_f + T_d \quad (28)$$

이다. 여기서 T_b 는 부하에 공급되는 토크이며, w_b 는 김벌 축의 각속도, J_b 는 관성 모멘트, B_b 는 점성 마찰 계수이며 T_f 는 마찰토크이다. 서보 모터에 대한 전압방정식은

$$e_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{emf} \quad (29)$$

$$T_m = J_m \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + \frac{1}{N} T_a \quad (30)$$

이다. 여기서 $w_m = N w_b$ 이며, e_a 는 전기자 전압, i_a 는 전기자 전류, V_{emf} 는 역기전력, R 는 전기자 저항, L 은 전기자 인덕턴스, T_m 은 모터에서 발생하는 토크, J_m 은 모터 관성모멘트, B_m 은 모터 점성마찰계수, w_m 은 모터의 각속도이다. 모터에서 발생하는 토크 T_m 및 역기전력 V_{emf} 은

$$\begin{aligned} T_m &= K_t i_a \\ V_{emf} &= K_b w_m \end{aligned} \quad (31)$$

이다. 여기서 K_t 는 모터 토크상수이며 K_b 는 역기전력 상수이다.

제어대상에 유입되어 시선의 흔들림을 유발하는 주요 외란원으로는 각속도 진동 w_{vh} 에 의해 유기되는 베어링 마찰토크 T_f 이며 마찰력 모델은 아래 식과 같은 비선형 특성을 보인다[10,11].

$$T_f = \frac{2}{\pi} T_0 \tan^{-1} \left(\frac{w_b - w_{vh}}{C_m} \right) \quad (32)$$

여기서 T_0 는 1.5(Nm)이며, C_m 은 곡선의 기울기를 결정하는 상수로서 0.01이다. 입력전압 u 에 대한 아마추어 전압 e_a 로의 서보증폭기의 전달함수

$$G_A(s) = \frac{A_0}{\tau_a s + 1} \quad (33)$$

및 전류제어기 전달함수

$$G_i(s) = \frac{\tau_p \cdot s}{\tau_f \cdot s + 1} \quad (34)$$

을 고려한다. 여기서 $u = K_c \cdot i_a$ 이며 K_c 는 전류제한 이득이다. 비선형함수 T_f 를 선형 함수 $w_b - w_{vh}$ 와 0의 조합으로 나타내면

$$T_f = M_{11} \cdot (w_b - w_{vh}) + M_{12} \cdot 0 \cdot (w_b - w_{vh}) \quad (35)$$

이며 $M_{12} = 1 - M_{11}$ 이다. 위 식으로부터 퍼지 함수

$$M_{11} = \frac{T_0}{w_b - w_{vh}} \left[\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{w_b - w_{vh}}{0.01} \right) \right] \quad (36)$$

이 구해진다. 모델링 식 (1)~(10)로부터 (36)의 퍼지 집합을 이용하여 비선형 시스템을 T-S 퍼지 모델로 나타내면

Plant Rule 1: IF $(w_b - w_{vh})$ is M_{11} THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A_1 + \Delta A_1)x(t) + B_{u1}(t)u(t) \\ &\quad + B_{d1}u(t-\tau) + (B_1 + \Delta B_1)w(t) \\ e(t) &= C_1x(t) + D_1u(t), \end{aligned} \quad (37)$$

Plant Rule 2: IF $(w_b - w_{vh})$ is M_{12} THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A_2 + \Delta A_2)x(t) + B_{u2}u(t) + B_{d2}u(t-\tau) \\ &\quad + (B_2 + \Delta B_2)w(t) \\ e(t) &= C_2x(t) + D_2u(t) \end{aligned} \quad (38)$$

이다. 여기서 $x = [w_b \ i_a \ e_a \ i_c]$, $w = [w_{vh} \ T_d]$ 이며

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{1-B}{J} & \frac{K_t}{J} N & 0 & 0 \\ -\frac{K_b}{L_a} N & -\frac{R_a}{L_a} & \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{A_0 K_c}{\tau_a} & -\frac{1}{\tau_a} - \frac{\tau_p A_0}{\tau_a \tau_f} & \frac{\tau_p A_0}{\tau_f \tau_a} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_f} & -\frac{1}{\tau_f} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{K_t}{J} N & 0 & 0 \\ -\frac{K_b}{L_a} N & -\frac{R_a}{L_a} & \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{A_0 K_c}{\tau_a} & -\frac{1}{\tau_a} - \frac{\tau_p A_0}{\tau_a \tau_f} & \frac{\tau_p A_0}{\tau_f \tau_a} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_f} & -\frac{1}{\tau_f} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$B_{u1} = B_{u2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (A_0)(K_g/\tau_d) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{x1} = B_{x2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.5(A_0)(K_g/\tau_d) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], \quad D = 1 \quad (40)$$

이다. 파라미터 불확실성을 갖는 J, B 는 (43)의 A_1, A_2 행렬에는 (1,1) 및 (1,2) 요소에 나타나고 (44)의 B_1, B_2 행렬에도 (1,1) 및 (1,2) 요소에 나타난다. 따라서 파라미터 불확실성 구조는

$$[\Delta A_i(t) \ \Delta B_i(t)] = HF(t)[E_{x1}, E_{u1}], \quad i=1,2$$

$$H^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{x1} = E_{x2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (41)$$

$$E_{u1} = E_{u2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다. 시선각속도에 대한 적분제어기를 설계하고, 적분요소를 시스템 모델에 포함시켜 확장된 시스템에 대하여 제어기를 설계한다. 시선 각속도에 대한 적분제어기를 설계하고, 적분제어기를 모델에 포함시켜 5차 시스템으로 확장한 다음 정리 1을 이용하여 제어기를 설계하면

$$K_1 = [0.0579 \quad -0.0541 \quad -1.1785 \quad 1.1892 \quad 9.5772]$$

$$K_2 = [0.0588 \quad -0.0541 \quad -1.1788 \quad 1.1896 \quad 9.4345] \quad (42)$$

이다. 이때 $\lambda = 0.1$, $\gamma = 3.32$ 이다.

수학적 모델과 설계된 제어기를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 제어갱신 주기는 10 KHz(0.1msec)로 수행하였다. 각속도 진동 w_{vh} 은 유색 진동신호로서 실효치가 약 100 mrad/sec 정도이며, 마찰토크는 (32)에 나타난 것과 같이 각속도 진동신호로 결합되고 그림 1과 같이 바이어스 형태의 신호이며 최대크기는 1.5(Nm)이다.

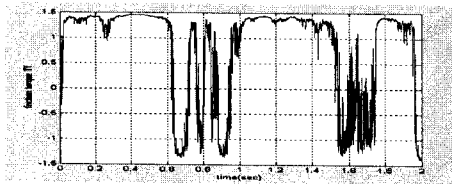


그림 1. 김벌 시스템의 마찰토크 신호

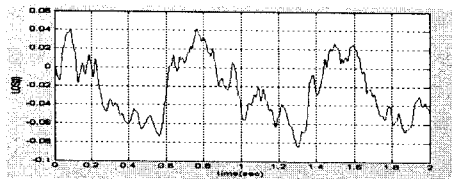


그림 2. 제어기의 시선각 오차 신호

각속도 명령을 영(0)으로 하고 제어기가 그림 1의 마찰토크 신호에 대한 영향을 얼마나 감소시킬 수 있는지 알아보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 그림 요구 성능인 0.1도 이내에 유지됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 시간지연 및 파라미터 불확실성을 갖는 비선형 시스템에 대한 지연 종속 퍼지 H_∞ 제어기를 설계하였다. 지연 종속 리아프노프 함수를 이용하여 페-루프 시스템의 안정성과 H_∞ 성능

을 만족하는 제어기 존재 조건을 선형 행렬 부등식으로 나타내었다. 이 선형행렬 부등식의 해로부터 페-루프 시스템의 안정성과 H_∞ 성능을 만족하는 퍼지 제어기를 바로 구할 수 있다. 지연 종속 제어기는 존재 조건을 나타내는 선형 행렬 부등식에 시간지연항의 크기를 포함하고 있으므로 시간지연항의 크기를 고려할 수 있다. 제안한 방법의 설계과정 및 타당성을 김벌 안정화 시스템 예제를 통하여 설계과정과 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

참고문헌

- [1] Y. Y. Cao and P. M. Frank, "Analysis and synthesis of nonlinear time-delay systems via fuzzy control approach," *IEEE Trans Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 200-211, April. 2000.
- [2] K. R. Lee, J. H. Kim, E. T. Jeung and H. B. Park, "Output feedback robust H_∞ control of uncertain fuzzy dynamic systems with time-varying delay," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 6, pp. 657-664, Decem. 2000.
- [3] X. Li and C. E. de Souza, "Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems : a linear matrix inequality approach," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 42, no. 8, pp. 1144-1148, August. 1997.
- [4] Y. S. Moon, P. Park, W. H. Kwon and Y. S. Lee, "Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems," *Int. J. Control.*, vol. 74, no. 14, pp. 1447-1455, 2001.
- [5] E. T. Jeung, D. C. Oh and H. B. Park, "Delay-dependent control for time-delayed fuzzy systems using description representation," *Int. J. of Control. Automation, and Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 182-188, June. 2004.
- [6] K. R. Lee, "Delay-dependent H_∞ filter design for delayed fuzzy dynamic systems," *Journal of control, automation, and systems engineering of korea*, vol 10, no. 7, pp618-624, July. 2004.
- [7] J. Hale. *Theory of Functional Differential Equations*. NewYork: Springer-Verlag, 1997.
- [8] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM, 1994.
- [9] P. Gahinet, A. Nemirovski, A. J. Laub, and M.Ghilali, *LMI Control Toolbox For Use with MATLAB*, The Math Works Inc., 1995.
- [10] J. M. Hilker and D. A. Hullender, "Adaptive Control System Techniques Applied to Inertial Stabilization Systems," *Proc. SPIE 1304*, pp. 190-206,1990.
- [11] C. D. Walrath, "Adaptive Bearing Friction Compensation Based on Recent Knowledge of Dynamic Friction," *Automatica*, vol. 20, pp. 717